

中深部碎屑岩储集层异常高孔隙度段 划分方案及研究意义

杨田¹ 操应长^{1,2*} 石世革³ 远光辉¹ 王艳忠¹ 李晓艳⁴

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 胜利油田桩西采油厂, 山东 东营 257000; 4. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 510240

摘要: 异常高孔隙度段的划分对指导中深层碎屑岩储集层油气勘探有重要意义。以东营凹陷南部缓坡带古近系沙河街组沙四上亚段滩坝砂岩储集层为研究对象, 通过物性测试、统计学分析等方法对其异常高孔隙度段进行划分。划分方案 1 通过确定混合岩相砂岩储集层最大正常孔隙度演化趋势线; 将大量发育高于该演化趋势线物性数据点, 且孔隙度包络线向孔隙度高值方向突出、孔隙度物性数据点集中分布的深度段划分为异常高孔隙度段。划分方案 2 利用给定深度区间孔隙度分布直方图分布形态, 确定正常与异常孔隙度分界点, 拟合正常与异常孔隙度分界趋势线; 与划分方案 1 相同的原则确定异常高孔隙度段。结果表明, 研究区目标层位存在 2110~2400 m、2540~3000 m、3100~3600 m 埋深范围的 3 个异常高孔隙度段。

关键词: 异常高孔隙度段; 划分方案; 中深层碎屑岩储集层; 东营凹陷

中图分类号: P618.130.2⁺1 文章编号: 1007-2802(2017)03-0483-10 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2017.03.012

Significance and Determination Method of Anomalously High Porosity Sections in Medium-Deep Clastic Reservoirs

YANG Tian¹, CAO Ying-chang^{1,2*}, SHI Shi-ge³, YUAN Guang-hui¹, WANG Yan-zhong¹, LI Xiao-yan⁴

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao Shandong 266071, China; 3. Zhuangxi Oil Production Plant of Shengli Oilfield, Dongying Shandong 257000, China; 4. Shengzhen Branch of CNOOC Ltd, Shenzhen Guangdong 510240, China

Abstract: The accurate determination method of anomalously high porosity sections is critical for the exploration of middle and deep burial clastic reservoirs. Taking the reservoirs of the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation (Es4s) in the south slope of the Dongying Sag as the research object, porosity testing, and statistical analysis were used to evaluate the division of anomalously high porosity sections. The first strategy raise the maximum porosity trend of mixed lithofacies sandstone reservoirs. The anomalously high porosity sections would have high anomaly of porosity envelop and concentrated distribution characters of reservoir. The second method determine the boundary normal and abnormal porosity through the shape of porosity distribution histogram, and then form the boundary between normal and abnormal porosity. Anomalously high porosity sections were then defined with the same rule as the first method. The results show that there are three anomalously high porosity sections in Es4s in the south slope of the Dongying Sag, with burial depth of 2110~2400 m, 2540~3000 m, and 3300~3700 m, respectively.

Key words: anomalously high porosity sections; determination method; medium-deep clastic reservoirs; Dongying Sag

收稿日期: 2016-07-14 收到, 2016-11-09 改回

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05006-003)

第一作者简介: 杨田(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向: 沉积学及油气储层地质学. E-mail: yangtian9645@126.com.

* 通讯作者简介: 操应长(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 沉积学、层序地层学及油气储层地质学. E-mail: cyc8391680@163.com.

1 问题的提出

自次生孔隙概念被提出以来,次生孔隙成因机制及相关理论日趋完善(Schmidt and McDonald, 1979; Giles, 1987; Surdam *et al.*, 1989)。随着油气勘探目标层位不断下潜,次生孔隙相对发育的中深部优质储集层成为油气勘探和科学研究的重要对象。国内外学者针对次生孔隙集中发育的储集层先后提出了次生孔隙带(袁静和王乾泽, 2001; 肖丽华等, 2003; 刘伟和朱筱敏, 2006; 邹才能等, 2007; 王艳忠, 2010; Zhu *et al.*, 2010; 刘绍军等, 2011; 孟元林等, 2014)、次生孔隙发育带(刘林玉, 1996; 袁静和赵澄林, 2000; 袁静和王乾泽, 2001; 袁静等, 2007; 高勇和张连雪, 2001; 肖丽华等, 2003; 孟元林等, 2006, 2011a, 2011b, 2013; 王成等, 2007; 朱筱敏等, 2007; 邹才能等, 2007; 谷团, 2008; 张云峰等, 2008, 2013; 王艳忠, 2010; 魏巍等, 2015)、次生孔隙发育密集带(庄松生等, 1998)、孔隙发育带(刘伟, 1997; 袁静等, 2001; 邹才能等, 2007)等概念, 以强调次生孔隙在形成中深层优质储集层中的重要作用。Ehrenberg(1993)首次提出异常高孔隙度的概念, Bloch等(2002)将其定义为统计学上比一种给定岩相(组分、结构)、年代、埋藏史和热史的典型砂岩最大孔隙度更高的那部分孔隙度, 并认为溶蚀作用形成次生孔隙, 绿泥石包壳、烃类充注、早期超压保存原生孔隙是异常高孔隙度主要成因。孟元林等(2006)、赵彦超和郭振华(2006)借鉴异常高孔隙度的概念, 提出异常高孔隙度带的概念简称异常高孔带(孟元林等, 2006, 2008, 2011a, 2011b; 张云峰等, 2008, 2011; 谷团, 2008; Meng *et al.*, 2010; 童传新等, 2013; 苏奥等, 2014; 肖丽华等, 2014; 邱隆伟等, 2015), 强调次生孔隙发育带仅是异常高孔隙度带的一种类型。此外, 不同学者还提出异常孔隙发育带(孟元林等, 2003)、异常高孔隙(王成等, 2007)、异常高孔隙带(曹瑞成等, 2009)和高孔带(孟元林等, 2006, 2011a, 2011b; 张云峰等, 2008, 2011)等与异常高孔隙度带相关的概念, 操应长等(2013a)建议将上述概念统称为异常高孔带, 强调存在原生和次生异常高孔带2种类型。远光辉等(2015)对国内外异常高孔带研究进展进行了系统总结, 指出原生异常高孔带与次生异常高孔带成因机制的差异及不同的油气勘探思路, 使得对中深层优质储集层的研究从单纯重视次生孔隙发育向次生孔隙发育与原生孔隙保存并重的趋势发展。

异常高孔隙度带是指孔隙度超过正常沉积和

正常成岩条件下碎屑岩最高孔隙度的储集层发育带(孟元林等, 2006); 主要通过孔隙度-深度剖面确定正常与异常孔隙度分界线(Bloch *et al.*, 2002; 钟大康等, 2003; 刘媛媛等, 2009; 王艳忠, 2010; 孟元林等, 2011b), 将纵向某个异常高孔隙度集中发育深度区间划分为异常高孔隙度带。然而, 异常高孔隙度带对应于孔隙度-深度剖面中某一深度区间, 该深度区间多同时包含高孔隙度与低孔隙度物性数据点(王艳忠等, 2013), 笼统以异常高孔隙度带表征该深度区间整体特征并不合理。大部分学者仅强调高孔隙度物性数据点的影响(刘林玉, 1996; 袁静等, 2001; 肖丽华等, 2003; 曹瑞成等, 2009; 张云峰等, 2011), 王艳忠(2010)通过将孔隙度物性下限引入到次生孔隙带划分中, 首次将孔隙度-深度剖面中的物性数据点划分为孔隙度下限以上高孔隙度储集层和下限以下低孔隙度储集层, 并将高孔隙度储集层集中发育深度区间定义为孔隙发育带。划分异常高孔隙度带的重要依据是确定正常与异常高孔隙度分界, 但目前不同确定方法存在一定争议。异常高孔隙度带的划分经历了早期以孔隙度物性数据点分布(高勇等, 2001)及代表孔隙度物性分布的趋势线如孔隙度包络线(刘林玉, 1996; 袁静等, 2001; 肖丽华等, 2003; 曹瑞成等, 2009; 张云峰等, 2011)、物性数据均值变化趋势线(刘伟和朱筱敏, 2006; 朱筱敏等, 2007)为划分依据到现阶段通过确定正常与异常高孔隙度划分界限, 结合物性数据点分布综合特征为划分依据的发展。现阶段, 正常与异常高孔隙度划分界限主要包括平均孔隙度随深度变化趋势线(Bloch *et al.*, 2002)、正常压实趋势线(刘媛媛等, 2009)、正常压实胶结线(孟元林等, 2011b)、孔隙正常演化曲线(Ramm, 1992)、孔隙度物性下限(王艳忠, 2010)。平均孔隙度随深度变化趋势线作为正常与异常孔隙度划分依据值得商榷; 正常压实趋势线、孔隙正常演化曲线主要是以正常压实趋势为划分依据, 但压实作用并不是使孔隙度降低的唯一正常成岩作用, 胶结作用起着同样的效果(孟元林等, 2011b); 正常压实胶结线考虑了胶结作用的影响, 但并未排除地层超压、油气充注、绿泥石包膜等条件对孔隙度保存的影响(操应长等, 2013a; 远光辉等, 2015)。

针对异常高孔隙度带定义和划分方案中存在的不足, 本研究在系统解析孔隙度-深度剖面基础上提出异常高孔隙度带的概念并对其相关含义进行阐述, 以东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂岩储集层为研究对象, 开展异常高孔隙度段划分方案研究,

旨在统一异常高孔隙度段的规范定义和确定异常高孔隙度段的科学划分方案,以期为中深层优质储集层的预测和油气勘探开发提供理论指导。

2 异常高孔隙度段的含义

在总结前人对次生孔隙带、次生孔隙发育带、异常高孔隙度带定义基础上,以孔隙度-深度剖面解析为基础,通过横向孔隙度值区间与纵向储集层埋深区间综合控制,开展物性分布特征精细表征(图1)。对横向孔隙度值区间以孔隙度带进行描述,重点表征其孔隙度大小分布特征;对纵向深度区间以孔隙度段进行描述,重点表征不同深度区间的孔隙度带分布组合规律,对其相关概念含义阐述如下:

孔隙度带指在孔隙度-深度剖面上通过孔隙度范围分界线,主要包括有效储层孔隙度下限、最大正常孔隙度演化曲线、孔隙度包络线,将孔隙度-深度剖面划分成不同的孔隙度值区间,按孔隙度值由低到高分无效孔隙度带、有效孔隙度带、异常高孔隙度带;实际地质条件下孔隙度带对应于不同的深度范围内给定孔隙度区间储集层在空间上的集中分布(图1)。孔隙度下限是指能够储集和渗流流体,并在现有的工艺技术条件下能够采出具有工业价值产液量(烃类或烃类与水的混合)的储集层所具有的最低孔隙度值(操应长等,2009)。最大正常孔隙度演化曲线是指在特定构造带内,正常埋藏成岩过程中未经历异常增孔和保孔地质作用的储集层孔隙度最大值随深度的演化趋势线(操应长等,2013a)。

孔隙度段是指在孔隙度-深度剖面上具有不同

的孔隙度带组合形式的深度区间,并以孔隙度值最高的孔隙度带作为孔隙度段命名依据,以体现该深度段储集层孔隙度的大小组合特征,譬如,无效孔隙度段、有效孔隙度段、异常高孔隙度段;在实际地质条件下孔隙度段对应于给定埋深区间不同大小孔隙度值的全部储集层(图1)。异常高孔隙度段是指在孔隙度-深度剖面上异常高孔隙度集中发育的深度段,包含两层含义:(1)在孔隙度-深度剖面上对应异常高孔隙度集中发育的深度范围;(2)在该深度范围内既包含异常高孔隙度带,也包含其他孔隙度带。

3 异常高孔隙度段划分方案

中深层油气勘探实践表明,异常高孔隙度集中发育的异常高孔隙度段多对应优质储集层发育段,是油气勘探开发的首选目标。异常高孔隙度带的确定是划分异常高孔隙度段的基础,异常高孔隙度带的划分主要依靠最大正常孔隙度演化曲线的确定。以东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂岩储集层为研究对象,探讨两种最大正常孔隙度演化曲线确定方法。

3.1 工区概况

东营凹陷为渤海湾盆地济阳拗陷中的一个次级构造单元,是在古生界基岩古地形背景上发育起来的中、新生代箕状断陷-拗陷湖盆(袁静等,2001;操应长等,2013b)。剖面上具有“北断南超”的特征,平面上划分为北部陡坡带、中央隆起带、利津洼陷、民丰洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷、南部缓坡带等二级构造单元(图2)。南部缓坡带西起利津洼陷西

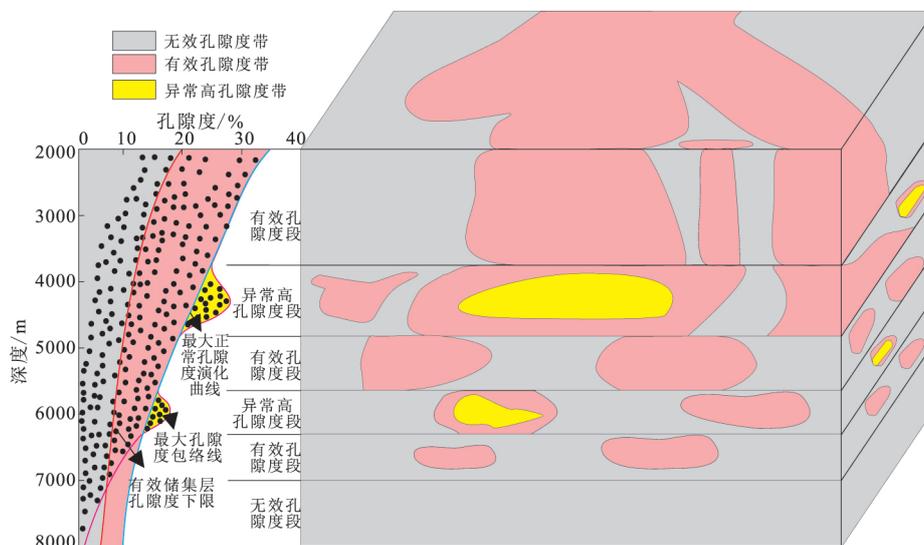
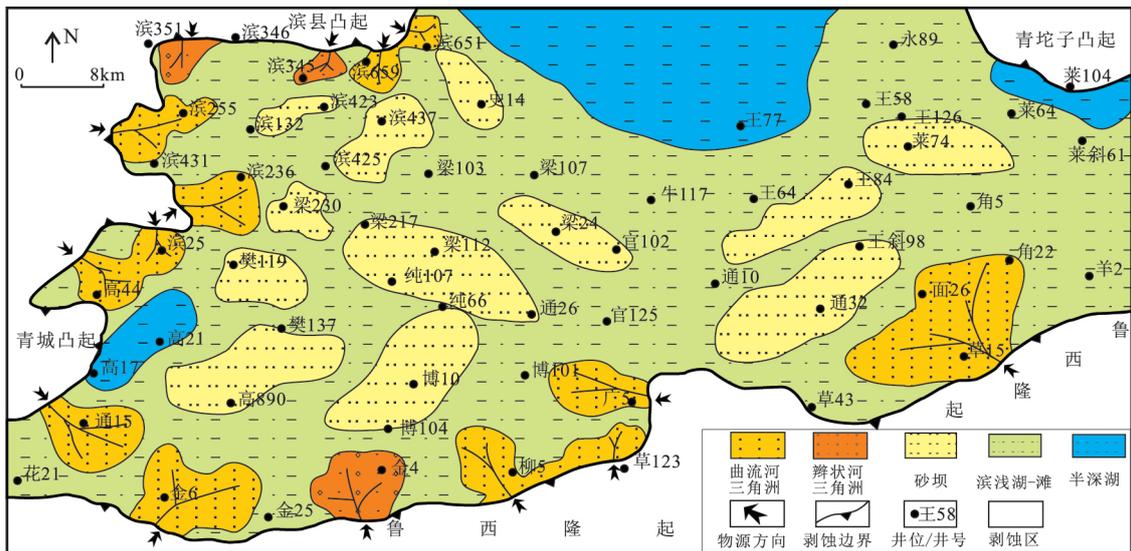


图1 异常高孔隙度段相关含义及空间展布理论模型

Fig.1 Theoretical model of spatial distribution of anomalously high porosity zones



图片据操应长等(2013b)

图2 东营凹陷南坡构造位置及沙四上亚段沉积相分布图

Fig.2 Tectonic setting of the south slope and distribution of sedimentary facies of the Es4 in the Dongying Sag

坡(滨东)、东至羊角沟油田,勘探面积约2500 km²,古近系沙河街组沙四上亚段主要发育滩坝砂岩储集层。

3.2 基于混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋势线的异常高孔隙度段划分方法

3.2.1 划分步骤 在研究区储集层物性数据点(实测物性)和分析测试资料(地层压力、含油性等)丰富情况下,通过探讨实际地质综合作用来厘定正常与异常孔隙度划分界限,综合孔隙度物性数据点分布、孔隙度包络线特征划分异常高孔隙度段,该划分方案赋予了异常高孔隙度段较强的勘探预测意义。借鉴孟元林等(2011b)对正常压实胶结线厘定方法,除将压实、胶结作用视为使孔隙度减小的正常成岩作用外,剔除地层超压、油气充注、绿泥石包膜、溶蚀作用(Bloch *et al.*, 2002)等延缓孔隙度减小的异常地质作用影响,厘定混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋势线,即在某一特定构造带,未经历异常增孔、保孔地质作用的多种混合岩相砂岩储集层孔隙度的包络线(操应长等,2013a)。混合岩相砂岩储集层即同时包含不同成分、不同粒径的多种岩相砂岩集合体。具体步骤如下:

(1) 根据地质特征,选择相似构造背景下储集层物性分析测试数据作为分析资料(实测物性);

(2) 根据声波时差测井资料,计算泥岩地层压力,结合试油资料测试的储集层地层压力系数,明确储集层地质压力与泥岩地层压力关系,明确各物性分析测试数据点所处深度地层压力;

(3) 根据综合解释成果,统计储集层物性分析测试数据点含油性情况;

(4) 剔除地层超压和饱和油-油浸、绿泥石包膜发育储集层物性数据点,选用不同深度常压、不含油-油斑储集层物性数据点,厘定混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋势线;

(5) 结合孔隙度物性数据点分布特征、孔隙度包络线分布,把明显发育高于混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋势线物性数据点且孔隙度包络线向孔隙度高值方向突出、孔隙度物性数据点集中分布的深度段划分为异常高孔隙度段。

3.2.2 研究实例 以东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂岩储集层3216块岩心实测孔隙度及对应的分析测试数据为依据。在统计试油资料测试地层压力系数的基础上,根据东营凹陷泥岩地层压力与储集层地层压力近似相等(何生等,2012),利用声波时差测井资料,采用等效深度法对孔隙度物性数据点地层压力进行计算,根据东营凹陷地层压力划分方案:常压(压力系数0.9~1.1)、弱超压(压力系数1.1~1.2)、中等超压(压力系数1.2~1.5)以及强超压(压力系数大于1.5)(邱桂强等,2003)对地层压力进行划分。根据综合解释资料,对孔隙度物性数据点含油性进行统计。由于东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂岩储集层中未见明显的绿泥石包膜(操应长等,2013b),本次研究不考虑其对孔隙度的影响。

剔除地层压力常压以上的数据点,以消除地层

超压对孔隙保存的影响;剔除含油级别为饱和油和油浸的数据点,以消除油气充注对孔隙保存的影响(李艳霞等,2003)和溶蚀增孔作用使孔隙度增大的影响(蔡进功等,2003)。选择地层压力为常压,含油级别为油斑及以下的物性数据点,绘制东营凹陷南坡孔隙度随深度演化趋势线即混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋势线(图3a),把明显发育高于混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋势线性数据点,且孔隙度包络线向孔隙度高值方向突出、孔隙度物性数据点集中分布的深度段划分为异常高孔隙度段(图3b)。如此,在东营南坡沙四上亚段滩坝砂岩储集层中划分出3个异常孔隙度段,其深度范围自上而下分别为:2110~2400 m、2540~3000 m、3100~3600 m。

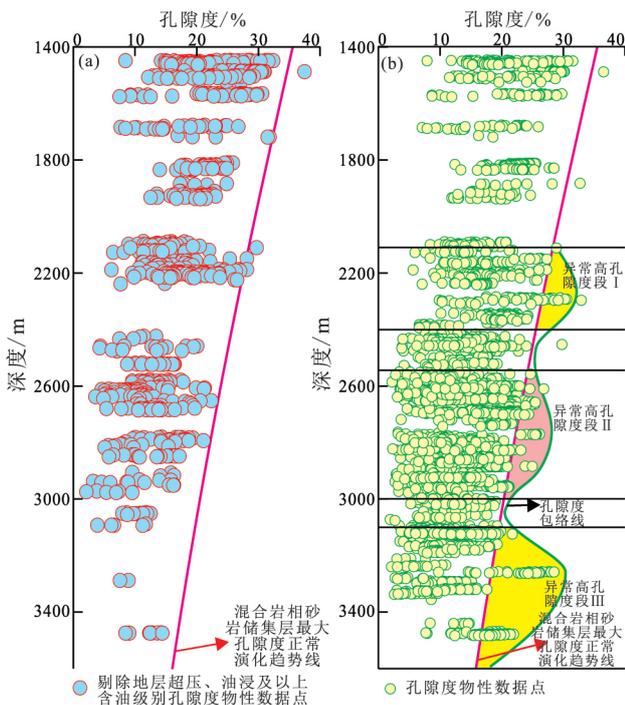


图3 东营凹陷南坡混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋势线控制的异常高孔隙度段划分模式

Fig.3 Anomalous high porosity zone dividing model under porosity maximum trend of mixed lithofacies sandstone reservoir in south slope of the Dongying Sag

3.3 基于孔隙度分布直方图控制的异常高孔隙度段划分方法

3.3.1 划分步骤 在研究区储集层分析测试资料较少情况下,以孔隙度物性数据点分布结合孔隙度包络线划分异常高孔隙度段。孔隙度-深度剖面中由于物性测试数据点的缺失易形成分布不连续的空白带,决定孔隙度包络线向孔隙度高值方向突出的数据点占整个异常高孔隙度段数据点的频率大

小等问题往往影响异常高孔隙度段划分的准确性(王艳忠等,2013)。通过借鉴 Bloch 等(2002)对异常高孔隙度的分析方法,利用储集层不同深度区间孔隙度分布直方图的分布特征,确定正常与异常孔隙度分界点及其演化特征,进一步拟合正常与异常孔隙度分界趋势线,综合孔隙度物性数据点分布特征来划分异常高孔隙度段,具体步骤如下:

- (1) 自上而下取连续固定深度区间实测孔隙度物性数据,绘制孔隙度分布直方图,根据孔隙度分布直方图特征,借鉴 Bloch 等(2002)对正常与异常孔隙度划分方法,确定正常与异常孔隙度分界点;
- (2) 根据储集层埋深,自上而下取不同深度起始点、不同深度区间固定深度段,重复步骤(1);
- (3) 将正常与异常孔隙度分界点进行组合,拟合正常与异常孔隙度分界点随深度演化趋势线;
- (4) 把明显发育高于正常与异常孔隙度分界线物性数据点,且孔隙度包络线向孔隙度高值方向突出、孔隙度物性数据点集中分布的深度段划分为异常高孔隙度段。

3.3.2 研究实例 根据东营凹陷南部缓坡带沙四上亚段滩坝砂岩储集层孔隙度-深度剖面 3216 块岩心实测孔隙度物性数据点分布特征,从 1400 ~ 3600 m 自上而下取每 100 m 深度区间孔隙度物性数据,绘制孔隙度分布直方图。根据孔隙度分布直方图分布特征,把单峰型似标准正态分布或具有小偏差的对数正态分布孔隙度直方图中的孔隙度视为正常孔隙度(图4a);把具有双峰型分布特征的孔隙度分布直方图中小孔隙度峰值分布区间定义为正常次总体,大孔隙度峰值分布区间定义为异常次总体(图4b),以正常与异常次总体过渡的中间孔隙度值划分正常与异常孔隙度(Bloch *et al.*, 2002)。对具有双峰分布特征的孔隙度分布直方图,直接确定正常与异常孔隙度分界的孔隙度值;对不具双峰分布特征的孔隙度分布直方图,以正常孔隙度的最大值作为正常与异常孔隙度分界的孔隙度值。从而求得从 1400 m 开始,每 100 m 深度区间内储集层的正常与异常孔隙度分界值(图5a)。

以 100 m 分区间,将起始深度调整为 1450 m,实现不同深度区间的交叉,以减少物性剖面中空白带的影响,用同样的方法分析不同深度段的孔隙度分布直方图,确定其正常与异常孔隙度的分界值(图5b)。以 200 m 分区间,起始深度分别定为 1400 m 和 1500 m;以 300 m 分区间,起始深度分别定为 1400 m 和 1500 m,对东营凹陷南部缓坡带孔隙度-深度剖面进行分析,确定不同起始深度、不同深度

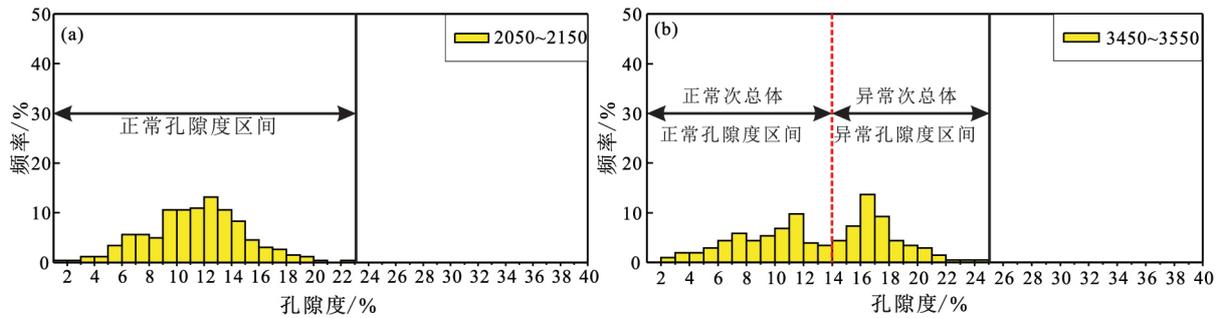


图4 孔隙度直方图分布特征
Fig.4 Distribution histogram of porosity

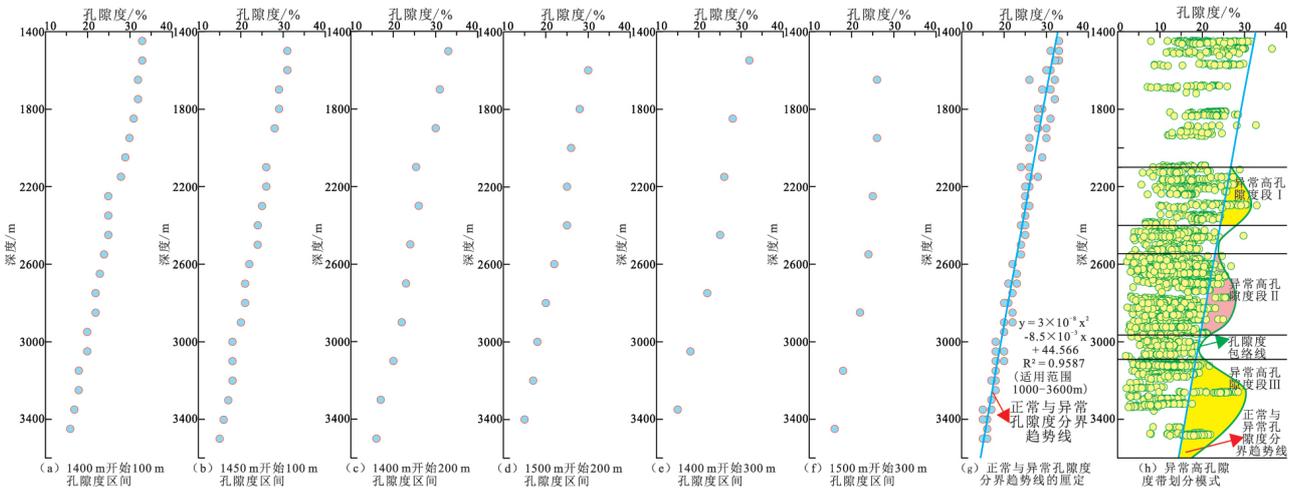


图5 东营凹陷南坡正常与异常孔隙度分界趋势线控制的异常高孔隙度段划分模式

Fig.5 Model of dividing anomalously high porosity zones under normal and abnormal porosity boundary trend in south slope of the Dongying Sag

区间控制下的孔隙度分布直方图中的正常与异常孔隙度分界值(图5c、5d、5f)。

将分析得到的正常与异常孔隙度分界值及其对应的深度区间中值绘制到同一孔隙度-深度坐标下,拟合正常与异常孔隙度分界点与埋藏深度的函数关系(图5g):

$$y = 3 \times 10^{-8} x^2 - 8.5 \times 10^{-3} x + 44.566 (R^2 = 0.9587)$$

得到正常与异常孔隙度分界趋势线。结合孔隙度物性数据点分布、孔隙度随包络线演化趋势,把明显发育高于正常与异常孔隙度分界线物性数据点,且孔隙度包络线向孔隙度高值方向突出、孔隙度物性数据点集中分布的深度段划分为异常高孔隙度段(图5h)。在东营南坡沙四上亚段滩坝砂岩储集层中划分出3个异常孔隙度段,其深度范围自上而下分别为:2100~2400 m、2540~2980 m、3080~3600 m。

4 两种划分方案的对比及应用

4.1 两种划分方案的对比

混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋

势线控制的异常高孔隙度段划分方法,以探讨控制正常与异常孔隙度的地质因素出发,在剔除形成异常高孔隙度地质因素影响的基础上确定正常与异常高孔隙度的分界线,进而指导异常高孔隙度段划分,该划分方法科学合理,但对研究区储集层孔隙度物性数据点分析测试资料要求较高,在资料相对匮乏地区应用比较困难。孔隙度分布直方图控制的异常高孔隙度段划分方法,单纯从孔隙度-深度物性剖面分析入手,通过孔隙度分布直方图分布特征来确定正常与异常孔隙度分界点;不同起始深度、不同深度区间孔隙度带的交叉,综合控制物性剖面中空白带的影响;确定正常与异常孔隙度分界点与深度的函数关系,形成正常与异常孔隙度分界趋势线,指导异常高孔隙度段划分。该划分方法对储集层孔隙度物性数据点分析测试资料要求较低,适用性更强,但划分步骤较繁琐。用该方法划分的异常高孔隙度段与利用混合岩相砂岩储集层最大孔隙正常演化趋势线控制划分的异常高孔隙度段基本一致,证明两种方法均能合理有效的划分异常高孔

隙度段。

4.2 划分方案的应用

综合应用两种方法,对东营凹陷北带沙四段-沙三中亚段砂砾岩储集层、中央隆起带沙三中亚段浊积岩储集层的异常高孔隙度段进行了划分(图6a、6c)。东营凹陷北带沙四段-沙三中亚段砂砾岩储集层由浅到深发育4个异常高孔隙度段,其深度范围自上而下分别为:2800~3200 m、3300~3700 m、3900~4400 m、4750~4900 m。东营凹陷中央隆起带沙三中亚段浊积岩储集层存在一个深度区间跨度较大的异常高孔隙度段,其埋深范围为2500~3500 m。对比东营凹陷南带沙四上亚段发育的埋深区间由浅到深为2110~2400 m、2540~3000 m、3100~3600 m的3个异常高孔隙度段可以发现(表1),由于构造背景和沉积相带不同,导致相同深度段的异常高孔隙度段的孔隙度均值不同。隆起带浊积岩储集层异常高孔隙度段孔隙度均值

最高,南部缓坡带滩坝砂砾岩储集层异常高孔隙度段孔隙度均值次之,北部陡坡带砂砾岩储集层异常高孔隙度段孔隙度均值最低。整体上从南部缓坡带到中央隆起带再到北部陡坡带,异常高孔隙度段的发育深度呈现增加的趋势。断陷湖盆不同构造带异常高孔隙度储集层的发育和分布规律可以为相应构造带优质储集层的钻前预测提供理论指导。

5 石油地质意义讨论

中深层优质储集层成因及其分布是现阶段石油地质学研究的热点问题(孙龙德等,2013),以次生孔隙理论为基础的中深层优质储集层成因及分布研究取得了丰硕的成果(孙龙德等,2013;远光辉等,2015),但由于研究过程中术语使用不当,给不同地区中深层优质储集层成因及对比研究带来了一定困难。特别是近年来大量以原生孔隙为主的中深层优质储集层的发现(金振奎等,2011;操应长

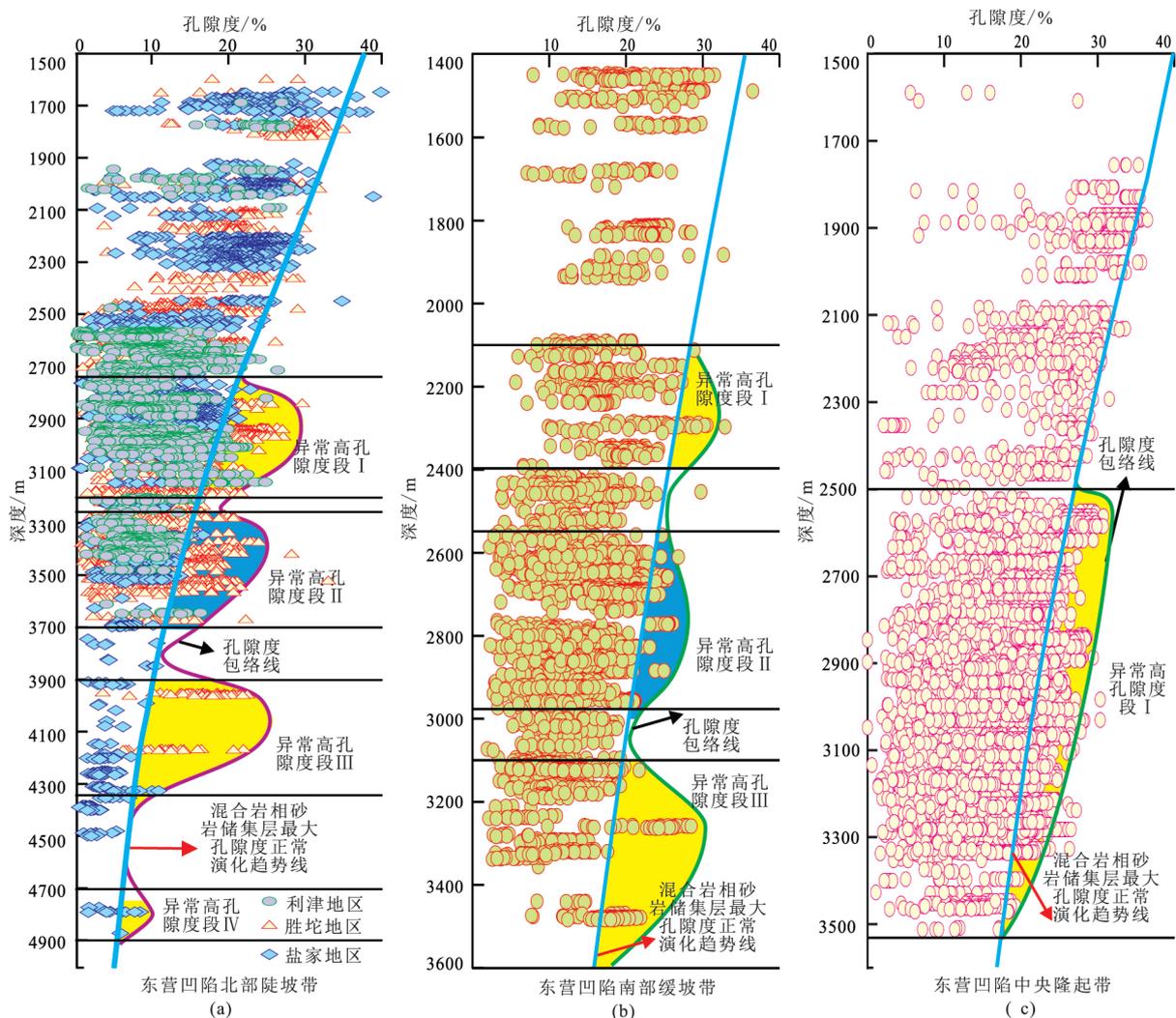


图6 东营凹陷不同构造带异常高孔隙度段分布特征

Fig.6 Distribution of anomalously high porosity zones in different structural belt of the Dongying Sag

表 1 东营凹陷异常高孔隙度段特征

Table 1 Characteristics of anomalously high porosity zones in the Dongying Sag

构造区块	研究层位	沉积类型	异常高孔隙度段	起始深度 /m	终止深度 /m	物性数据点 /个	最小孔隙度 /%	最大孔隙度 /%	孔隙度均值 /%
南部缓坡带	沙四上亚段	滩坝砂	I	2114	2400	326	3.1	33.5	18.21
			II	2540	3000	1446	1.6	27.3	14.22
			III	3100	3600	573	1.6	29	12.53
北部陡坡带	沙四-沙三亚段	砂砾岩	I	2800	3200	2350	0.4	29.5	12.75
			II	3300	3700	1516	0.7	32.9	9.4
			III	3900	4400	219	0.4	22.3	8.23
			IV	4750	4900	15	1.5	5.3	4.84
中央隆起带	沙三中亚段	浊积岩	I	2500	3500	6782	1.1	30.8	17.22

等 2013a) ,使得该问题进一步凸显。长期以来 ,中深层优质储集层都是作为一个相对概念存在(郭迎春等 2012) ,异常高孔隙度段的划分厘定 ,为优质储集层的确定提供了有利契机(操应长等 ,2013a; 邱隆伟等 2015) ,以异常高孔隙度带代表优质储集层 ,以异常高孔隙度段表征储集层高孔隙度发育特征能包含不同孔隙类型 ,对简化、统一术语和不同地区中深层优质储集层的对比统一研究起到明显促进作用。

钻前预测一直是困扰石油地质学研究的难题(Giles *et al.* , 1992; Taylor *et al.* , 2010) ,特别是针对高勘探风险的中深层油气储集层。通过确定最大正常孔隙度演化曲线划分异常高孔隙度带 ,进而确定异常高孔隙度段 ,开展中深层油气储集层钻前预测 ,能够为中深层油气勘探目标优选 ,减低勘探风险提供科学依据。在确定最大正常孔隙度演化曲线的基础上 ,结合有效储集层物性下限的研究能

够实现孔隙度-深度剖面的精细解析(王艳忠等 , 2013) ,通过孔隙度段内不同孔隙带储集层沉积结构、物质组成和成岩作用等地质综合特征对比(远光辉等 2015) ,有利于明确优质储集层成因机制及其相同深度范围内的横向展布规律; 通过不同孔隙度段的对比 ,能够进一步明确储集层纵向演化及分布规律 ,从而为中深层优质储集层成因机制及空间展布规律研究提供理论指导。以东营凹陷南部缓坡带异常高孔隙度段控制因素分析为例(图 7) ,通过对比不同异常高孔隙度段内无效孔隙度带(A) 、有效孔隙度带(B) 、异常高孔隙度带(C) 储集层控制因素差异可知 ,沉积相带和岩性的差异是导致相同深度区间内储集层质量分异的主要原因。对比不同深度区间异常高孔隙度段内储集层控制因素差异可知 ,随着埋深增加 ,地层压力和含油性控制了异常高孔隙度储集层的发育。因而 ,在异常高孔隙度段 I 中 ,以寻找坝主体、滩脊控制的细砂岩为

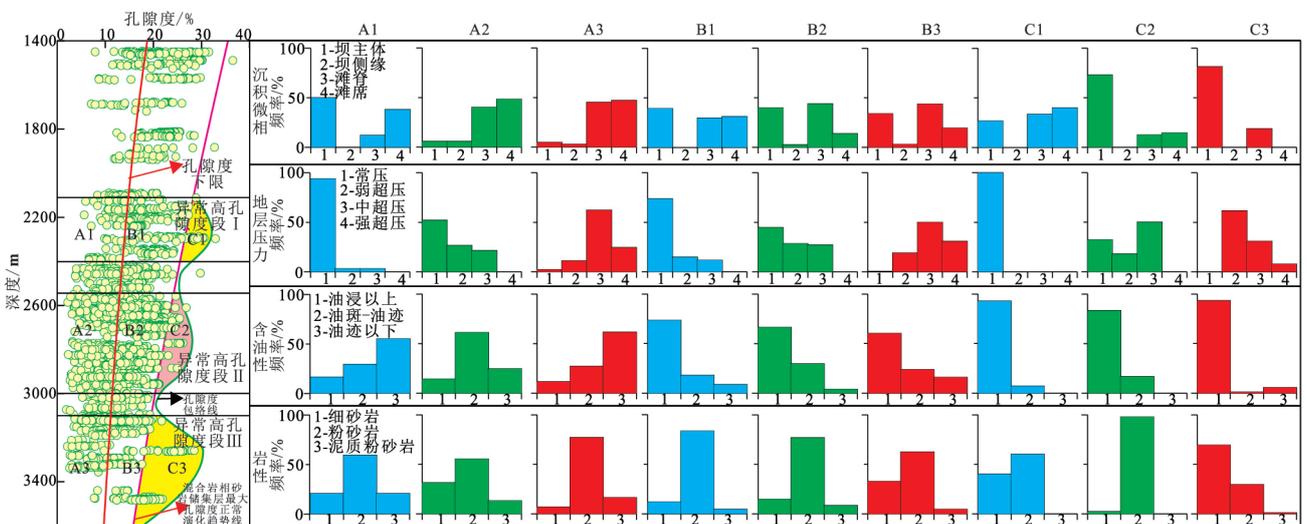


图 7 东营凹陷南部缓坡带异常高孔隙度段控制因素分析

Fig.7 Controlling factors of anomalously high porosity zones in south slope of the Dongying Sag

主的优质储集层为主; 在异常高孔隙段 II 和 III 中, 以寻找地层超压发育、含油饱和度较高的优质储集层为主。

6 结论

(1) 异常高孔隙度段是指在孔隙度-深度剖面上对应异常高孔隙度带发育的深度区间: 在该深度范围内异常高孔隙度集中发育, 既包含高孔隙度物性数据点也包含低孔隙度物性数据点。

(2) 混合岩相砂岩储集层最大孔隙度正常演化趋势线控制的异常高孔隙度段划分方法和孔隙度分布直方图控制的异常高孔隙度段划分方法在东营南坡沙四上亚段滩坝砂岩储集层中自上而下确定了埋藏深度范围为 2110~2400 m、2540~3000 m 和 3100~3600 m 的 3 个异常高孔隙度段。

(3) 东营南坡沙四上亚段滩坝砂岩储集层在异常高孔隙度段 I 中, 以寻找坝主体、滩脊控制的细砂岩为主的优质储集层为主; 在异常高孔隙段 II 和 III 中, 以寻找地层超压发育、含油饱和度较高的优质储集层为主。

参考文献 (References):

Bloch S, Lander R H, Bonnell L. 2002. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability. *AAPG Bulletin*, 86(2): 301-328

Ehrenberg S. 1993. Preservation of Anomalously high porosity in Deeply Buried Sandstones by Grain-Coating Chlorite: Examples from the Norwegian Continental Shelf. *AAPG Bulletin*, 77(7): 1260-1286

Giles M R. 1987. Mass transfer and problems of secondary porosity creation in deeply buried hydrocarbon reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 4(3): 188-204

Giles M R, Stevenson S, Martin S V, Cannon S J C, Hamilton P J, Marshall J D, Samways G M. 1992. The reservoir properties and diagenesis of the Brent Group: A regional perspective. *Geological Society, London, Special Publications*, 61(1): 289-327

Meng Y L, Liang H W, Meng F J, Wu H Y, Wang C, Xiu H W, Zhang A D, Li Y G, Guo R X. 2010. Distribution and genesis of the anomalously high porosity zones in the middle-shallow horizons of the northern Songliao Basin. *Petroleum Science*, 7(3): 302-310

Ramm M. 1992. Porosity-depth trends in reservoir sandstones: Theoretical models related to Jurassic sandstones offshore Norway. *Marine and Petroleum Geology*, 9(5): 553-567

Schmidt V, McDonald D A. 1979. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. *SEPM Special Publication*, 26: 175-207

Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, Heasl H P. 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73(1): 1-23

Taylor T R, Giles M R, Hathon L A, Diggs T N, Braunsdorf N R, Bir-

biglia G V, Kittridge M G, Macaulay C I, Espejo I S. 2010. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality. *AAPG Bulletin*, 94(8): 1093-1132

Zhu X M, Zhu S F, Xian B Z, Chen S P, Kuang L C, Xu X K, Xue J J, You X C. 2010. Reservoir differences and formation mechanisms in the Ke-Bai overthrust belt, northwestern margin of the Junggar Basin, China. *Petroleum Science*, 7(1): 40-48

蔡进功, 张枝焕, 朱筱敏, 谢忠怀, 李艳霞, 刘洪军, 袁东山. 2003. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用. *石油勘探与开发*, 30(3): 79-83

曹瑞成, 曲希玉, 文全, 鲍春艳, 刘剑营, 刘娜, 刘立. 2009. 海拉尔盆地贝尔凹陷储集层物性特征及控制因素. *吉林大学学报: 地球科学版*, 39(1): 23-30

操应长, 王艳忠, 徐涛玉, 刘惠民, 高永进. 2009. 东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂岩有效储集层的物性下限及控制因素. *沉积学报*, 2009, 27(2): 230-237

操应长, 远光辉, 李晓艳, 杨田, 王艳忠. 2013a. 东营凹陷北带古近系中深层异常高孔带类型及特征. *石油学报*, 34(4): 683-691

操应长, 杨田, 王健, 远光辉, 葱克来, 李晓艳. 2013b. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂岩有效储集层成因. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 37(6): 1-9

高勇, 张连雪. 2001. 板桥-北大港地区深层碎屑岩储集层特征及影响因素研究. *石油勘探与开发*, 28(2): 36-39

谷团. 2008. 辽河盆地西部凹陷清水洼陷新生界深层异常高孔带特征与有利储集相预测研究. *天然气地球科学*, 19(3): 327-333

郭迎春, 庞雄奇, 陈冬霞, 朱宏权. 2012. 川西坳陷中段须二段致密砂岩储集层致密化与相对优质储集层发育机制. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(S2): 21-32

何生, 宋国奇, 王永诗, 郝雪峰, 王冰洁, 黎娜, 罗胜元. 2012. 东营凹陷现今大规模超压系统整体分布特征及主控因素. *地球科学-中国地质大学学报*, 37(5): 1029-1042

金振奎, 苏奎, 苏妮娜. 2011. 准噶尔盆地腹部侏罗系深部优质储集层成因. *石油学报*, 32(1): 25-31

李艳霞, 刘洪军, 袁东山, 张枝焕, 朱筱敏, 钟大康, 蔡进功, 谢忠怀. 2003. 石油充注对储集层成岩矿物演化的影响. *石油与天然气地质*, 24(3): 274-280

刘林玉. 1996. 吐鲁番-哈密盆地中生界砂岩次生孔隙研究. *石油实验地质*, 18(3): 317-324

刘绍军, 卢双舫, 张亚金, 黄文彪. 2011. 次生孔隙带预测新技术及其在大庆长垣以西地区的应用. *沉积学报*, 29(2): 207-216

刘伟. 1997. 苏北溱潼凹陷戴南组一段次生孔隙形成与分布特征. *岩相古地理*, 17(2): 24-31

刘伟, 朱筱敏. 2006. 柴西南地区第三系碎屑岩储集层次生孔隙分布及成因. *石油勘探与开发*, 33(3): 315-318

刘媛媛, 于炳松, 朱金富, 钟高明, 张林林. 2009. 辽河滩海西部凹陷古近系碎屑岩储集层成岩作用及其对储集层物性的影响. *现代地质*, 23(4): 731-738

孟元林, 肖丽华, 殷秀兰, 李臣, 秦建忠, 冯文彦. 2003. 渤海湾盆地文安斜坡高温热流体活动与油气藏形成. *岩石学报*, 19(2): 337-347

孟元林, 高建军, 刘德来, 牛嘉玉, 孙洪斌, 周玥, 肖丽华, 王粤川. 2006. 辽河坳陷鸳鸯沟地区成岩相分析与异常高孔带预测. *吉林大学学报: 地球科学版*, 36(2): 227-233

- 孟元林, 吴巍, 姜文亚, 刘德来, 牛嘉玉, 孙洪斌, 肖丽华, 施尚明. 2008. 双清地区储集层异常高孔带分布特征与成因分析. 中国海上油气, 20(3): 148-151
- 孟元林, 丁桂霞, 吴河勇, 姜文亚, 修洪文, 李亚光, 王又春, 王伟. 2011a. 松辽盆地北部泉三、四段异常高孔隙带预测. 中国石油大学学报: 自然科学版, 35(4): 8-13
- 孟元林, 刘文慧, 孟凡晋, 梁伯勋, 王建伟, 潘雪梅, 田伟志, 王维安, 丁桂霞, 周振东, 肖丽华. 2011b. 松辽盆地徐家围子断陷深层异常高孔带分布特征与成因分析. 古地理学报, 13(1): 75-84
- 孟元林, 梁洪涛, 魏巍, 修洪文, 李亚光, 邵红梅, 胡安文, 张磊. 2013. 油沸石溶蚀过程的热力学计算与次生孔隙发育带预测——以徐家围子断陷深层为例. 沉积学报, 31(3): 509-515
- 孟元林, 祝恒东, 李新宁, 吴晨亮, 胡安文, 赵紫桐, 张磊, 许丞. 2014. 白云岩溶蚀的热力学分析与次生孔隙带预测——以三塘湖盆地二叠系芦草沟组二段致密凝灰质白云岩为例. 石油勘探与开发, 41(6): 690-696
- 邱桂强, 凌云, 樊洪梅. 2003. 东营凹陷古近系烃源岩超压特征及分布规律. 石油勘探与开发, 30(3): 71-75
- 邱隆伟, 徐宁宁, 刘魁元, 杨生超, 解超, 单宝杰, 武玉玺. 2015. 渤南洼陷沙四上亚段储集层异常高孔带及优质储集层成因机制. 天然气地球科学, 26(1): 1-12
- 苏奥, 陈红汉, 曹来圣, 李成海, 雷明珠, 赵玉涛. 2014. 西湖凹陷砂岩储集层异常高孔带分布及成因. 沉积学报, 32(5): 949-956
- 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 张云辉, 张水昌, 张宝民, 朱光有, 高志勇. 2013. 中国深层油气形成、分布与潜力分析. 石油勘探与开发, 40(6): 641-649
- 童传新, 孟元林, 谢玉洪, 高煜婷, 刘景环, 张伙兰, 胡安文, 肖丽华. 2013. 莺歌海盆地异常高孔带分布与成因分析. 矿物岩石地球化学通报, 32(6): 720-728
- 王成, 赵海玲, 邵红梅, 洪淑新, 张静, 潘会芳, 杨连华, 王平, 乔建华. 2007. 松辽盆地北部登娄库组砂岩次生孔隙形成时期与油气成藏. 岩石矿物学杂志, 26(3): 253-258
- 王艳忠. 2010. 东营凹陷北带古近系次生孔隙发育带成因机制及演化模式. 博士学位论文. 青岛: 中国石油大学(华东)
- 王艳忠, 操应长, 蕙克来. 2013. 次生孔隙发育带的概念及石油地质意义新认识. 吉林大学学报(地球科学版), 43(3): 659-668
- 魏巍, 朱筱敏, 孟元林, 朱世发, 刘文慧, 周凯, 郑妍. 2015. 基于热力学与动力学方法预测碎屑岩的次生孔隙发育带. 中南大学学报(自然科学版), 46(10): 3822-3831
- 肖丽华, 孟元林, 侯创业, 李杰, 马文杰, 王雪松, 杨俊生. 2003. 松辽盆地升平地区深层成岩作用数值模拟与次生孔隙带预测. 地质论评, 49(5): 544-551
- 肖丽华, 张阳, 吴晨亮, 杜虹宝, 孟元林, 高煜婷, 王志国. 2014. 渤海湾盆地歧北次凹超压背景下异常高孔带成因分析与有利储集层预测. 天然气地球科学, 25(8): 1127-1134
- 远光辉, 操应长, 贾珍臻, 王艳忠, 杨田. 2015. 含油气盆地中深层碎屑岩储集层异常高孔带研究进展. 天然气地球科学, 26(1): 28-42
- 袁静, 赵澄林. 2000. 水介质的化学性质和流动方式对深部碎屑岩储集层成岩作用的影响. 石油大学学报(自然科学版), 24(1): 60-63
- 袁静, 王乾泽. 2001. 东营凹陷下第三系深部碎屑岩储集层次生孔隙垂向分布及成因分析. 矿物岩石, 21(1): 43-47
- 袁静, 张善文, 乔俊, 陈鑫. 2007. 东营凹陷深层溶蚀孔隙的多重介质成因机理和动力机制. 沉积学报, 25(6): 840-846
- 张云峰, 冯亚琴, 王春香. 2008. 十屋断陷异常高孔带分布特征及成因. 大庆石油学院学报, 32(6): 5-8
- 张云峰, 王国强, 付宝利, 李晶, 王春香. 2011. 长岭断陷深层碎屑岩储集层成岩作用及异常高孔带成因. 吉林大学学报(地球科学版), 41(2): 372-376
- 张云峰, 李易霖, 赵慧, 储田甜, 万炆, 姜海燕. 2013. 十屋断陷深层储集层异常低压与次生孔隙发育带耦合关系分析. 地质科学, 48(3): 870-878
- 赵彦超, 郭振华. 2006. 大牛地气田致密砂岩气层的异常高孔隙带特征与成因. 天然气工业, 26(11): 62-65
- 钟大康, 朱筱敏, 张枝焕, 蔡进功, 谢忠怀. 2003. 东营凹陷古近系砂岩储集层物性控制因素评价. 石油勘探与开发, 30(3): 95-98
- 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 张琴, 张枝焕, 张善文, 吕希学. 2007. 济阳坳陷古近系储集层孔隙类型与次生孔隙成因. 地质学报, 81(2): 197-204
- 庄松生, 左燕春, 黎琼. 1998. 苏北溱潼凹陷戴南组二段成岩作用与次生孔隙预测. 矿物岩石, 18(4): 64-71
- 邹才能, 侯连华, 匡立春, 况军. 2007. 准噶尔盆地西缘二叠-三叠系扇控成岩储集相成因机理. 地质科学, 42(3): 587-601

(本文责任编辑: 郑秀娟、刘莹; 英文审校: 高剑峰)